第38卷 第3期
2021年5月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 38 No. 3
May 2021

宁夏阅海湿地水质评价及其空间差异性研究

杨 蕾[1,2]， 璩向宁[1,2]， 马正虎[1,2]， 张矞勋[1,2]， 田 媛[1,2]， 何志润[1,2]

（1. 宁夏大学西北土地退化与生态系统恢复省部共建国家重点实验室培育基地，宁夏 银川 750021；
2. 宁夏大学西北土地退化与生态系统恢复与重建教育部重点实验室，宁夏 银川 750021）

摘 要：为了进一步查明水深、芦苇分布、进水口、排水口分布等因素对宁夏阅海湿地水质的影响程度，于2019年春季（5月）、夏季（8月）、秋季（11月）分别对阅海湿地水质按《地表水环境质量标准（GB3838-2002）》进行了14个水点采集分析，利用模糊综合评价法对湿地水质的空间分布差异性特征进行了评价。结果表明：(1) 阅海湖泊水质指标季节分布特征为，各水质指标大多介于Ⅲ~Ⅳ类水质。其中，5月水质最差，11月相对较好，8月居中。(2) 阅海湖泊水质指标空间分布特征为，5月阅海水体在浅水区属于Ⅱ类水质，在芦苇区、入水口、深水区属于Ⅳ类水质；8月在深水区、芦苇区属于Ⅳ类水质，在入水口属于Ⅰ类水质，在其他区域均属于Ⅲ类水质；11月在入水口属于Ⅳ类水质，其余区域属于Ⅲ类水质。(3) 阅海湖泊水质指标的时空变化与旅游活动、人工补水、鸟类栖息繁衍等外源输入、自然和人为原因对湖泊底泥的扰动有关。研究结果对阅海湿地等干旱区水资源的管理以及生态环境治理均有一定的参考作用。

关键词：阅海湿地；水质；模糊综合评价；空间差异性；宁夏

湿地是陆地生态系统与水生生态系统之间的过渡地带，是地球圈层相互作用的关键区域[1-2]，其多样的生态功能与人类生存、繁衍、发展等密切相关。湿地被誉为“地球之肾”，在调节气候、涵养水源、补充地下水[3-4]、维持区域生态平衡以及保护生物多样性等方面具有不可替代的作用[5-6]，是地球上单位面积生态服务价值最高、固碳能力最强的生态系统[7-8]，是重要的自然资源、基因库，也是天然的蓄水库，特别是珍稀水禽的繁殖地和越冬地[9]。湿地的水环境是湿地生态系统中最重要的一部分，也是其形成、持续演替、消亡与再生的关键[10]。水体是湿地生态系统的基本因子，水体对湿地的形成、演化、保护及发挥其功能具有决定性的控制作用[11]。随着人类经济活动的日趋强烈，更多的天然湿地受到干扰破坏，致使湿地生态功能下降乃至消失[12]。

水质评价是水污染治理工作中的基础内容，定期检测、评价水质能为制定合理的水污染防治策略提供科学依据[13-14]。一直以来，湿地湖泊的水质状况是社会关注的焦点。由于湿地水环境是一个复杂系统，存在许多不确定性因素，具有明显的模糊性，单一的评价方法难以全面、综合的对湿地水环境进行定量评价，而模糊数学法能有效地解决评价边界模糊和监测误差对评价结果的影响。模糊综合评价法以模糊数学理论为基础，通过隶属函数表示模糊状态，利用隶属度对样本进行分类，根据最大隶属度原则，确定水质类别[15]。国内科研工作者也开展了相关研究工作。尹发能等[16]对大冶湖的水质评价表明，水体总磷和总氮含量超标程度严重，水质总体上属于Ⅴ类水质；周玲等[17]对洪泽湖9个断面的水质进行综合评价，结果表明，9个断面中水质为Ⅴ类的所占比例较大；陈宇[18]对交流干溪4个断面水质评价，得出4个断面全年水质类别均为Ⅰ类；王玉芬等[19]对黄河万家寨水库水质进行模糊综合评价，结果表明平水期和枯水期水质都属于Ⅰ类；敖成欢等[20]对贵州省百花湖2013—2016年水质进行模糊综合评价，评价为Ⅰ类水，影响水质的主要因子是TN、TP。

阅海湿地是由原位于银川城西北的西湖，通过

收稿日期：2020-09-07； **修订日期：**2021-01-18
基金项目：宁夏重点研发项目（重点项目）（2018BFG02001）
作者简介：杨蕾（1993-），女，硕士研究生，主要研究方向为生态环境监测与评估. E-mail: yanglei010905@163.com
通讯作者：璩向宁. E-mail: xn_qu@163.com

退耕还湿、人工运河——典农河与流域其他湖沼连通、并扩大加深而形成的近南北向外展布的湖泊湿地。湖泊沿途人为活动形式多样强烈，点源和非点源以及外源和内源污染物多重交织，使得影响阅海水质变化的原因十分复杂。前人对宁夏阅海湿地的研究相对较少，白维东等[21]根据2009—2011年对阅海水质的连续监测分析，发现阅海水质平面上呈现中度污染—重度污染—中度污染的年度变化特征；钟艳霞等[22]利用综合污染指数法对2011—2012年的阅海水质进行了评价，并利用等距离权重内插的方法，对水中氨氮、TP、COD_{cr}和BOD5等4类主要污染物空间分布进行了分析，发现春季3月阅海湿地的污染最为严重，各点位的污染变化显著；10月污染整体相对较轻，各点位的污染差异也较小。李世龙等[23]对2015—2017年阅海湿地水生生态系统进行了健康评价，表明其水生生态系统总体为亚健康状态。本文以阅海湿地为研究对象，综合考虑湖泊水深、芦苇展布以及进水口、排水口分布等不同影响因素，深入讨论了湖泊水质的时空分布特征，并利用模糊综合评价法对其水质状况进行了定量评价，得到了明确的结论。研究结果对阅海湿地等干旱区水资源的管理以及生态环境治理均有一定的参考作用。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

阅海湿地位于银川市金凤区，距市中心仅3 km左右，西依包兰铁路，南为城市道路，地理位置介于106°11′~106°14′E、38°31′~38°37′N，海拔1100 m，南北长10 km，东西宽2.7 km，湿地总面积2.27 km^2，其中湖泊面积1.79 km^2、沼泽湿地面积0.09 km^2、人工湿地面积0.38 km^2，丰水期平均水深可达3 m以上，水资源较丰富，水生植被较完整，具有较完整的生物多样性，是我国干旱地区鸟类迁徙的重要栖息地和中转站之一，对城市生物多样性的保护和生态环境的改善有着重要的作用[24]。阅海在地貌上处于贺兰山山前黄河冲湖积平原，是引黄灌区的主体，土地肥沃，农耕发达，不同地区农作物种类不同，灌溉方式不同，地下水的补给条件和动态变化也有所不同[25]。作为城市湿地，在生态景观营造、生态环境改善、湿地旅游休憩等方面发挥着重要作用，成为维护宁夏平原绿洲稳定的重要节点，生态地位十分重要。而水质又是影响湿地生态质量的重要因素，由于阅海是通过人工运河——典农河与流域其他湖沼相连通，改变了其独立湖沼的属性，流程较长，沿途生境及其人为活动多样，点源和非点源以及外源和内源污染物多重交织，使影响阅海水质变化的原因复杂、多样。

1.2　数据采集与预处理

1.2.1　样点设置与样品采集　结合遥感影像、谷歌地球地图以及实地考察等手段，在综合考虑周边环境面源、点源污染、空间距离以及植被分布等因子的基础上，根据水深、芦苇分布、补水及排水口空间分布状况等，在阅海湿地内从补水口至排水口由南到北，根据湿地内植被及岛屿分布的前提下，设置数据采集点14个，使用GPS记录各个采集点坐标，后续采样点保持一致，分季节采样，按5月（春季）、8月（夏季）、11月（秋季），采样点位置见图1。于水面下50 cm处用取水器进行取样，装入聚乙烯瓶避光保存，采样完成后随即带回实验室于冰箱4 ℃避光保存，样本采集后及时对水样进行水质指标浓度测定，室内水样测定指标选取TN、TP、NH_3-N、TOC、

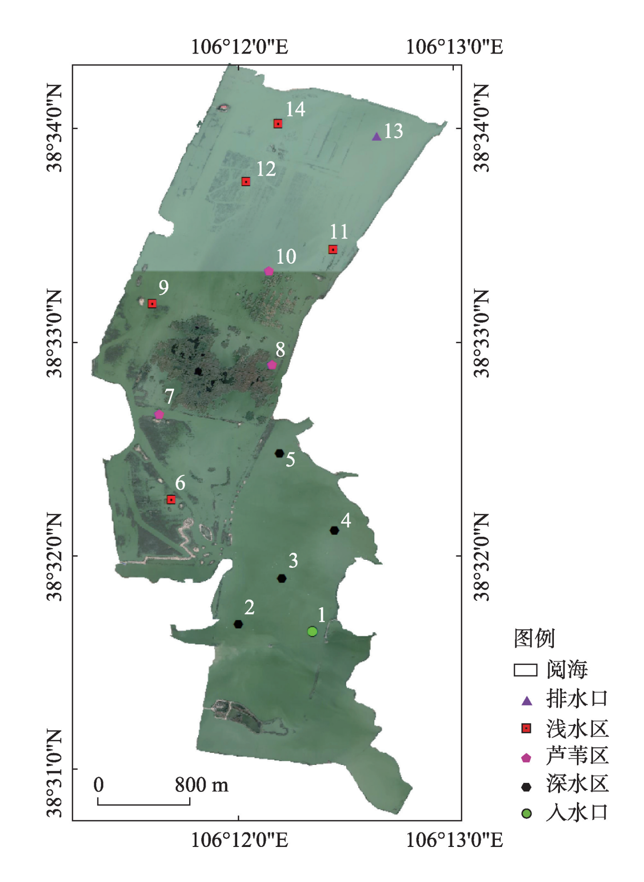


图1　采样点位置

Fig. 1　Sampling point location

COD_{Mn}以及悬浮物等指标，其中悬浮物指标，需要取部分水样用0.45 μm滤膜过滤后测定。现场测得水温、透明度、水深、pH值、电导率、溶解氧、总溶解性固体TDS等指标。各采样点信息见表1。

1.2.2 样品处理与测试方法 样品取回后测定TP、TN、NH_3-N、COD_{Mn}、悬浮物、TOC等指标浓度。总磷用钼酸铵分光光度法测定；NH_3-N用纳氏试剂分光光度法测定；COD_{Mn}用高锰酸钾滴定法；TN用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法；TOC用总有机碳分析仪测得，悬浮物用重量法测定。

1.3 研究方法

采用模糊综合评价法进行阅海水质评价。评价步骤：

（1）确定评价对象的因子集。根据一定的原则和实测数据，选取评价指标，建立评价因子集。根据阅海湿地的水质，选取的水质指标有5个，选取的评价因子记为c_j，则评价因子集写为U＝{TN，TP，NH_3-N，DO，COD_{Mn}}。

（2）建立评价等级，根据《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》，分为Ⅰ~Ⅴ5个等级标准，即V={Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ，Ⅳ，Ⅴ}。

（3）模糊关系矩阵的建立。模糊关系矩阵包括5个评价指标和5种等级标准，因此就构成了一个5×5阶的单因子隶属度模糊矩阵函数。

（4）确定隶属度向量。根据5类水质标准，分别作出对应5个级别的隶属函数通式。对于极小型分布，其通式如下[26-28]：

对于Ⅰ级水：即j=1时的隶属度函数为：

$$\gamma_{i1}=\begin{cases}1, & c_i\leqslant s_{i1}\\ \dfrac{s_{i2}-c_i}{s_{i2}-s_{i1}}, & s_{i1}<c_i<s_{i2}\\ 0, & c_i\geqslant s_{i2}\end{cases} \tag{1}$$

对于Ⅱ～Ⅳ级水质，即j=2, 3, 4时的隶属度函数为：

$$\gamma_{ij}=\begin{cases}0, & c_i\geqslant s_{i(j+1)}\text{或}c_i\leqslant s_{i(j-1)}\\ \dfrac{c_i-s_{i(j-1)}}{s_{ij}-s_{i(j-1)}}, & s_{i(j-1)}<c_i\leqslant s_{ij}\\ \dfrac{s_{i(j+1)}-c_i}{s_{i(j+1)}-s_{ij}}, & s_{ij}<c_i\leqslant s_{i(j+1)}\end{cases} \tag{2}$$

对于末级水质，即j=5时的隶属度函数为：

$$\gamma_{ij}=\begin{cases}0, & c_i\leqslant s_{i(j-1)}\\ \dfrac{s_{ij}-c_i}{s_{ij}-s_{i(j-1)}}, & s_{i(j-1)}<c_i\leqslant s_{ij}\\ 1, & c_i\leqslant s_{i(j+1)}\end{cases} \tag{3}$$

式中：c_i是评价因子的实测值；s_1、s_2、s_3、s_4、s_5是相对应水质的标准值。

（5）模糊综合评价矩阵的建立。根据隶属度函数确定模糊矩阵Y。

（6）建立模糊权重系数集，公式如下：

$$\omega_i=\frac{c_i}{s_i} \tag{4}$$

式中：c_i是评价因子的实测值；s_i是该评价因子五类标准的平均值。

为了进行模糊运算，因子权重必须在[0，1]区

表1 采样点信息表

Tab. 1 Sampling point location

位置	编号	经度(E)	纬度(N)	区域
览山公园附近	1	106°12′20.13″	38°31′38.13″	入水口
阅海欢乐岛	2	106°11′59.48″	38°31′40.34″	深水区
南部湖心区	3	106°12′11.51″	38°31′53.14″	深水区
花博园南侧区	4	106°12′26.46″	38°32′06.63″	深水区
花博园北部区	5	106°12′10.89″	38°32′28.24″	深水区
西湖沟浅滩处	6	106°11′40.64″	38°32′15.17″	浅水区
芦苇区西侧	7	106°11′37.18″	38°32′39.25″	芦苇区
芦苇区东侧	8	106°12′08.78″	38°32′53.14″	芦苇区
环阅海公路旁	9	106°11′35.29″	38°33′10.16″	浅水区
芦苇区北部	10	106°12′07.87″	38°33′19.37″	芦苇区
四二干沟附近	11	106°12′25.91″	38°33′25.41″	浅水区
阅海北部浅滩	12	106°12′01.64″	38°33′44.49″	浅水区
三一支沟附近	13	106°12′38.15″	38°33′57.38″	浅水区
北部垂钓区	14	106°12′10.60″	38°34′00.75″	排水口

间上取值[18],所以对权重ω_i进行归一化处理,即

$$A_i=\frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^{n}\omega_i},\quad \sum_{i=1}^{n}A_i=1 \qquad (5)$$

根据以上公式,计算得到各监测点的权重集A_i,$A_i=(a_1,a_2,a_3\cdots a_n)$。

(7)最后根据矩阵值确定综合评价等级B。

2　结果与分析

2.1　季节分布特征

由图2可见,不同季节阅海湖泊水体TN,TP、NH_3-N、DO、COD_{Mn}、悬浮物等水质指标具有明显的季节性分布特征。

TN浓度在11月各个采样点均高,只有采样点2、4、5、7未超过1 mg·L^{-1},5月次之,8月最低,采样点8和采样点9超过Ⅲ类水标准1 mg·L^{-1},分别达到1.08 mg·L^{-1}和1.01 mg·L^{-1}。

TP指标在季节分布上差异性显著,5月最高,只有采样点9未超过0.1 mg·L^{-1},平均值为0.11 mg·L^{-1},8月和11月的TP指标均在0.05 mg·L^{-1}以下,平均值分别为0.04 mg·L^{-1}和0.03 mg·L^{-1}。

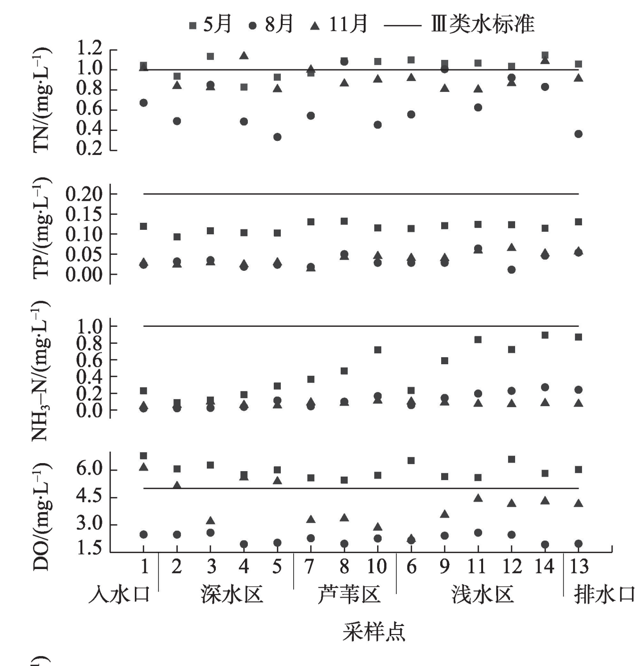
NH_3-N指标季节性差异更为显著,其中5月各采样点均高,并且浅水区部分点位和排水口以及芦苇区10号点均超过0.5 mg·L^{-1},8月次之,11月最低。

溶解氧DO指标作为反映污染水体严重程度的重要指标,是保证水生生物生存和水生态环境平衡的重要因素[29-30],其在季节分布上差异明显,溶解氧5月最高,11月次之,8月最低,平均值为2.25 mg·L^{-1}。

COD_{Mn}指标呈现不同季节性变化趋势,整体在6.56~9.22 mg·L^{-1}之间,COD_{Mn}在5月出现最大值,达到了9.22 mg·L^{-1},出现在芦苇区7号点。8月COD_{Mn}指标浓度均值相对升高,11月COD_{Mn}指标在各个采样点浓度分布比较均匀,整体在6.70~8.45 mg·L^{-1}之间。

总有机碳TOC是以碳含量表示水体中有机物质总量的综合指标,它能够较准确反映水质有机污染的总体情况,因而被作为评价水体中有机物污染程度的一项重要参考评价指标[31]。

悬浮物是造成湖泊浑浊的主要原因,也是评价水体污染的重要指数。悬浮物浓度在5月、8月、11月的平均值分别为50.67 mg·L^{-1}、53.61 mg·L^{-1}、32.14 mg·L^{-1}。TOC指标表现出与TP及NH_3-N相同变化趋势,5月各区域浓度均超过了10 mg·L^{-1},至8月,各区域均急剧降低,整体浓度在3.90~13.7 mg·L^{-1}之间,11月与8月相差不大,但入水口、深水区以及排水区浓度则整体升高,14个采样点中11个点TOC浓度升高。综合水体各指标评价状况发现:阅海水体不同水质指标以及同一水质指标,在不同季节乃至相同季节均存在明显差异。



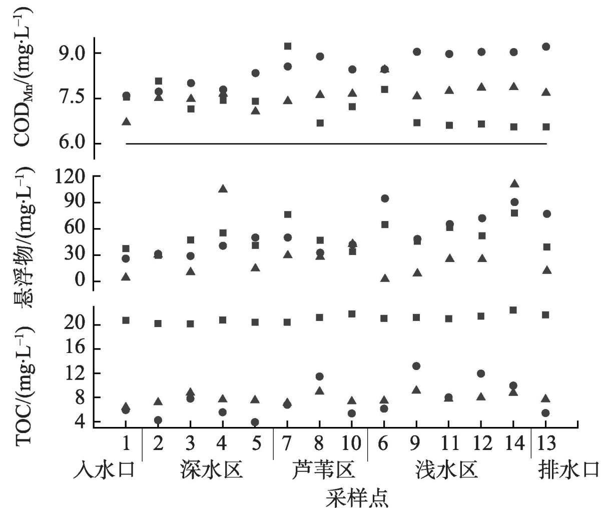


图2　水质指标季节变化特征

Fig. 2　Seasonal distribution characteristics of water quality indicators

2.2　模糊综合评价分析

2.2.1　*隶属函数的确定*　运用公式(1)(2)(3),建立综合隶属度矩阵Y,评价采用梯形分布确定隶属函数。以2019年5月1号采样点为例,计算得到的隶属函数矩阵如下:

$$Y1=\begin{bmatrix}0.00 & 0.00 & 0.04 & 0.96 & 0.00\\0.00 & 0.20 & 0.80 & 0.80 & 0.20\\0.77 & 0.23 & 0.00 & 0.00 & 0.00\\0.53 & 0.37 & 0.00 & 0.00 & 0.00\\0.00 & 0.00 & 0.39 & 0.61 & 0.00\end{bmatrix}$$

同理计算得到其他2个月监测点的隶属函数矩阵。

2.2.2 各月水质指标权重　对5月、8月、11月水质指标权重系数进行计算，并进行归一化处理，得到权重集A（表2，表3、表4）。总磷、总氮和高锰酸盐指数超标是表示造成阅海湖水质恶化和水体富营养化的主要原因，而总磷和总氮主要来源于工业废水、生活废水和化肥中的氮、磷元素。

2.2.3 模糊矩阵的复合运算　根据模糊水质模型，将权重集A与模糊关系矩阵Y代入计算，即可得到模糊综合评价集B，以5月1号采样点为例：

$$B=A*Y=[0.188\ \ 0.0.297\ \ 0.043\ \ 0.277\ \ 0.196]\begin{bmatrix}0.00 & 0.00 & 0.04 & 0.96 & 0.00\\0.00 & 0.20 & 0.80 & 0.00 & 0.00\\0.77 & 0.23 & 0.00 & 0.00 & 0.00\\0.53 & 0.47 & 0.00 & 0.00 & 0.00\\0.00 & 0.00 & 0.39 & 0.61 & 0.00\end{bmatrix}=$$

$$[0.180\ \ 0.200\ \ 0.321\ \ 0.299\ \ 0.000]$$

同理计算得到其他2个月各监测点指标的模糊

表2　5月评价指标权重系数归一化结果

Tab. 2　Ormalization results of weight coefficient of evaluation indexes in May

采样点	总氮	总磷	氨氮	溶解氧	高锰酸盐指数
1	0.188	0.297	0.043	0.277	0.196
2	0.180	0.269	0.019	0.288	0.244
3	0.172	0.304	0.025	0.289	0.209
4	0.225	0.278	0.036	0.253	0.208
5	0.166	0.286	0.059	0.274	0.214
6	0.176	0.293	0.045	0.277	0.210
7	0.177	0.310	0.065	0.218	0.229
8	0.164	0.338	0.090	0.230	0.179
9	0.155	0.313	0.113	0.239	0.180
10	0.165	0.285	0.133	0.231	0.186
11	0.146	0.306	0.154	0.225	0.169
12	0.153	0.294	0.129	0.258	0.165
13	0.157	0.303	0.151	0.230	0.159
14	0.189	0.269	0.157	0.224	0.160

表3　8月评价指标权重系数归一化结果

Tab. 3　Normalization results of weight coefficient of evaluation indexes in August

采样点	总氮	总磷	氨氮	溶解氧	高锰酸盐指数
1	0.250	0.143	0.007	0.204	0.396
2	0.199	0.132	0.008	0.222	0.440
3	0.287	0.134	0.006	0.193	0.380
4	0.206	0.140	0.008	0.183	0.464
5	0.140	0.167	0.008	0.189	0.494
6	0.200	0.196	0.007	0.171	0.427
7	0.221	0.079	0.008	0.204	0.488
8	0.321	0.172	0.006	0.129	0.371
9	0.299	0.160	0.006	0.158	0.377
10	0.163	0.220	0.007	0.180	0.428
11	0.191	0.244	0.006	0.174	0.385
12	0.254	0.242	0.005	0.150	0.350
13	0.126	0.265	0.007	0.152	0.451
14	0.256	0.215	0.006	0.132	0.391

表4　11月评价指标权重归一化结果

Tab. 4　Results of normalization of evaluation index weight in November

采样点	总氮	总磷	氨氮	溶解氧	高锰酸盐指数
1	0.281	0.086	0.012	0.365	0.254
2	0.259	0.119	0.016	0.313	0.291
3	0.328	0.137	0.029	0.204	0.304
4	0.241	0.073	0.017	0.358	0.312
5	0.266	0.092	0.015	0.342	0.285
6	0.336	0.118	0.031	0.151	0.364
7	0.316	0.080	0.029	0.235	0.339
8	0.298	0.185	0.023	0.202	0.292
9	0.314	0.114	0.027	0.232	0.314
10	0.330	0.118	0.034	0.192	0.327
11	0.262	0.212	0.018	0.240	0.267
12	0.316	0.040	0.018	0.280	0.337
13	0.274	0.190	0.019	0.237	0.280
14	0.294	0.160	0.021	0.243	0.283

综合评价集B。

对14个点位的模糊综合评价集进行整理，就得到阅海湖5月，8月、11月的模糊综合评价集B(表5、表6、表7)。

2.3　阅海水质状况空间差异性特征

对其模糊综合评价结果进行IDW空间插值。通过对阅海湿地水质的模糊综合评价结果进行空间插值(图3)，可以发现，阅海水质类别在不同的季节也有明显的空间差异性。其中，5月水质评价结果中有超过一半以上的采样点水质类别是Ⅳ类水，入水口(采样点1号)，芦苇区(采样点7~采样点8号)、排水口(采样点14号)、深水区(采样点2~采样点5号)均是Ⅳ类。8月水质评价结果中有超过一半的采样点水质类别是Ⅲ类水，其中，深水区(2号点~4号点)和芦苇区(8号点)的水质级别是Ⅳ类，浅水区(6号点~7号点，11号点~13号点)和排水口(14号点)水质级别都是Ⅲ类。11月水质评价结果中有超过一半的采样点水质级别是Ⅲ类，其中，水体在入水口1号点和芦苇区7号点的水质级别都是Ⅳ类，其余区域都是Ⅱ类水或Ⅲ类水。

表5　5月水质模糊综合评价结果

Tab. 5　Fuzzy comprehensive evaluation results of water quality in May

点位	Ⅰ类水	Ⅱ类水	Ⅲ类水	Ⅳ类水	Ⅴ类水	水质类别
1	0.147	0.130	0.332	0.860	0.193	Ⅳ
2	0.154	0.211	0.293	0.342	0.000	Ⅳ
3	0.079	0.328	0.228	0.334	0.030	Ⅳ
4	0.033	0.193	0.196	0.578	0.000	Ⅳ
5	0.037	0.375	0.064	0.500	0.000	Ⅳ
6	0.133	0.337	0.122	0.379	0.000	Ⅳ
7	0.024	0.168	0.269	0.402	0.138	Ⅳ
8	0.008	0.305	0.201	0.385	0.102	Ⅳ
9	0.000	0.262	0.277	0.199	0.263	Ⅲ
10	0.000	0.357	0.229	0.175	0.240	Ⅱ
11	0.000	0.311	0.240	0.184	0.257	Ⅱ
12	0.000	0.325	0.139	0.185	0.312	Ⅱ
13	0.006	0.543	0.102	0.303	0.055	Ⅱ
14	0.000	0.312	0.174	0.487	0.027	Ⅳ

表6 8月水质模糊综合评价结果

Tab. 6 Fuzzy comprehensive evaluation results of water quality in August

采样点	Ⅰ类水	Ⅱ类水	Ⅲ类水	Ⅳ类水	Ⅴ类水	水质类别
1	0.335	0.103	0.324	0.239	0.000	Ⅰ
2	0.146	0.193	0.189	0.355	0.118	Ⅳ
3	0.123	0.218	0.276	0.301	0.081	Ⅳ
4	0.155	0.199	0.209	0.255	0.183	Ⅳ
5	0.233	0.082	0.287	0.213	0.184	Ⅲ
6	0.079	0.148	0.436	0.177	0.161	Ⅲ
7	0.087	0.018	0.515	0.231	0.149	Ⅲ
8	0.069	0.108	0.318	0.373	0.129	Ⅳ
9	0.065	0.101	0.292	0.448	0.093	Ⅳ
10	0.171	0.220	0.261	0.214	0.133	Ⅲ
11	0.127	0.205	0.394	0.201	0.073	Ⅲ
12	0.125	0.336	0.307	0.153	0.081	Ⅲ
13	0.197	0.201	0.361	0.090	0.152	Ⅲ
14	0.137	0.253	0.384	0.094	0.132	Ⅲ

表7 11月水质模糊综合评价结果

Tab. 7 Fuzzy comprehensive evaluation results of water quality in November

采样点	Ⅰ类水	Ⅱ类水	Ⅲ类水	Ⅳ类水	Ⅴ类水	水质类别
1	0.099	0.032	0.400	0.468	0.000	Ⅳ
2	0.121	0.243	0.178	0.458	0.000	Ⅳ
3	0.132	0.034	0.348	0.302	0.184	Ⅲ
4	0.090	0.370	0.356	0.184	0.000	Ⅱ
5	0.107	0.359	0.325	0.209	0.000	Ⅱ
6	0.134	0.015	0.491	0.244	0.116	Ⅲ
7	0.110	0.297	0.168	0.425	0.000	Ⅳ
8	0.139	0.069	0.396	0.395	0.000	Ⅲ
9	0.127	0.014	0.462	0.397	0.000	Ⅲ
10	0.137	0.015	0.411	0.409	0.029	Ⅲ
11	0.124	0.276	0.412	0.188	0.000	Ⅲ
12	0.057	0.157	0.569	0.207	0.000	Ⅲ
13	0.137	0.231	0.462	0.171	0.000	Ⅲ
14	0.121	0.220	0.480	0.179	0.000	Ⅲ

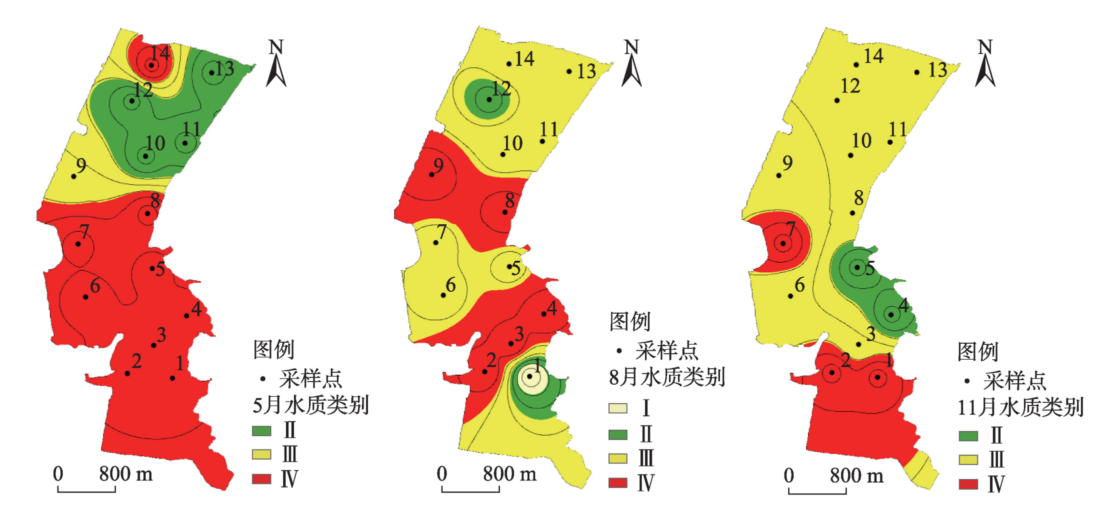


图3 各季节水质模糊综合评价结果空间插值

Fig. 3 Spatial interpolation of fuzzy comprehensive evaluation results of water quality in different seasons

3 讨 论

3.1 季节分布特征分析

阅海水体各水质指标大多介于地表水Ⅲ~Ⅳ类水质,在季节变化上有明显差异性。其中水质指标在5月相对最高,可能是因为春季挺水植物,浮游植物都属于萌芽阶段,尚未消耗营养物质的缘故。再者4月末5月初进行了一次大规模的集中补水活动,一方面外源输入,另一方面春季多风,底泥受到风浪扰动,污染物质悬浮,从而影响水质,这从图2中5月悬浮物总体大于其他各月也可得到佐证。

8月水质指标较11月相对较高,总体上Ⅲ类和Ⅳ类水质的点位数8月多于11月,加之8月COD_{Mn}含量的平均值高于5月和11月,反映出8月是旅游旺季,由于旅游活动导致了各类污染物入湖,水质污染负荷较大,从而影响水质。另一方面,水体污染物中TN、TP和TOC的平均值分别为0.66 $mg\cdot L^{-1}$、0.03 $mg\cdot L^{-1}$和7.54 $mg\cdot L^{-1}$,均小于11月的0.91 $mg\cdot L^{-1}$、0.04 $mg\cdot L^{-1}$和7.83 $mg\cdot L^{-1}$。可能是8月是水生植物生长旺盛时期,植物生长吸收了水体中的营养物质,水质得以净化的缘故。

11月水质指标总体最低,水质相对较好。虽然也进行了人工补水,但秋季风浪小,对底泥的影响小。

3.2 阅海水质空间差异性特征分析

5月阅海水体在浅水区属于Ⅱ类水质,在芦苇区、入水口、深水区属于Ⅳ类水质,可能原因是芦苇区也为鸟类栖息繁殖地,外源输入污染物浓度高,而芦苇吸附作用尚未形成,从而导致污染物指标浓度高;入水口区域水质相对较差,可能原因一方面是补给水源水质相对较差,另一方面,靠近城市,人类活动频繁,造成污染物输入;深水区为旅游对外开放区,且东岸分布绿博园,西岸分布有阅海游乐场,均涉及水上游览项目,人为活动污染输入以及底泥扰动,均会导致该区域水质状况发生恶化。

8月阅海水体在深水区、芦苇区属于Ⅳ类水质,在入水口属于Ⅰ类水质,在其他区域属于Ⅲ类水质。8月是旅游活动的高潮期,游客众多,人为活动外源输入以及绿博园径流污染物输入,均可导致该区域水质变差;8月虽然芦苇快速生长而吸附作用明显,但不足以抵消由于鸟类栖息繁殖带来的污染物输入,故芦苇区表现较高的污染水平。入水口水质较好,是因为8月未进行人工补水,外源输入较少。

11月阅海水体在入水口、芦苇区西侧属于Ⅳ类水质,水质较差,其余区域水质均属于Ⅲ类水质,可能是因为11月进行了一次集中的补水活动,受到外源输入影响,导致入水口的水质较差;芦苇区西侧的水质指标较高,原因同前。其他区域水质相对较好,是因为11月是旅游淡季,人为活动少,外源输入以及对湖泊底泥扰动较小,区域污染物指标较低。

4 结 论

(1)通过对阅海湖泊水质指标季节分布特征分析发现,阅海水体各水质指标大多介于Ⅲ~Ⅳ类水质,在季节变化上有明显差异性。其中水质指标在5月相对最高,11月最低,8月最低,反映5月水质最差,11月相对较好,8月居中。

(2)通过对阅海湖泊水质指标空间分布特征分析发现,5月阅海水体在浅水区属于Ⅱ类水质,在芦苇区、入水口、深水区属于Ⅳ类水质;8月在深水区、芦苇区属于Ⅳ类水质,在入水口属于Ⅰ类水质,在其他区域均属于Ⅲ类水质;11月在入水口属于Ⅳ类水质,其余区域属于Ⅲ类水质。

(3)阅海湖泊水质指标的时空变化与人工补水、旅游活动、鸟类栖息繁衍等外源输入、自然和人为原因对湖泊底泥的扰动有关。

(4)因受实验条件的限制,本实验没有监测到补水水源和底泥污染物,今后应采集补水水源和底泥污染物,深化补水和底泥污染物对阅海水质的影响。

参考文献(References):

[1] 周俊. “地球表层”再讨论[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(6): 1−7. [Zhou Jun. The second discussion on the “Earth's surface layer” [J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13(6): 1−7.]

[2] 杨永兴, 王世岩. 三江平原湿地生态系统P、K分布特征及季节动态研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 522−526. [Yang Yongxing, Wang Shiyan. Distribution characteristics and seasonal dynamics of phosphorus and potassium in wetland ecosystem in zhe sanjiang plain[J]. Journal of Applied Ecology, 2001, 12(4): 522−526.]

[3] 周亚军, 刘廷玺, 段利民, 等. 锡林河流域上游河谷湿地景观格局演变及其驱动力[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 580−590. [Zhou Yajun, Liu Tingxi, Duan Limin, et al. Driving force analysis

and landscape pattern evolution in the up stream valley of Xilin River Basin[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 580–590.]

[4] 潘世兵, 杨贵羽, 唐蕴, 等. 黄旗海湿地水量模拟与平衡分析[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 383–389. [Pan Shibing, Yang Guiyu, Tang Yun, et al. Simulation of water inflow and water balance of Huangqihai Lake Wetland[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(2): 383–389.]

[5] 缑倩倩, 屈建军, 王国华, 等. 中国干旱半干旱地区湿地研究进展[J]. 干旱区研究, 2015, 32(2): 213–220. [Gou Qianqian, Qu Jianjun, Wang Guohua, et al. Progress of wetland researches in arid and semi-arid regions in China[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(2): 213–220.]

[6] 周华荣. 干旱区湿地多功能景观研究的意义与前景分析[J]. 干旱区地理, 2005, 28(1): 16–20. [Zhou Huarong. Prospect onmultifunctional landscapes of Marshes inArid Areas[J]. Arid Land Geography, 2005, 28(1): 16–20.]

[7] Costanza R, D'arge R, Groot D E, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387: 253–260.

[8] Duarte C M, Middelburg J J, Caraco N. Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle[J]. Biogesciences, 2005, 2: 1–8.

[9] 国家林业局. 中国湿地保护行动计划[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000: 1–2. [State Forestry Administration. China Wetland Protection Action Plan[M]. Beijing: China Forestry Press, 2000: 1–2.]

[10] 崔保山, 杨志峰. 湿地学[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2006: 39–40. [Cui Baoshan, Yang Zhifeng. Wetland Science[M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 2006: 39–40.]

[11] Mitsch W J, Gosselink J G. Wetlands[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 2000: 2–5.

[12] 田应兵, 熊明标, 宋光煜. 若尔盖高原湿地土壤的恢复演替及其水分与养分变化[J]. 生态学杂志, 2005, 24(1): 21–25. [Tian Yingbing, Xiong Mingbiao, Song Guangyu. Restoration succession of wetland soils and their changes of water and nutrient in Ruoergai Plateau[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(1): 21–25.]

[13] Saeed A, Hashmi I. Evaluation of anthropogenic effects on water quality and bacterial diversity in Rawal Lake, Islamabad[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(5): 2785–2793.

[14] Alves R I S, Machado C S, Beda C F, et al. Water quality assessment of the Pardo River Basin, Brazil: A multivariate approach using limnological parameters metal concentrations and indicator bacteria[J]. Archives of Environmenal and Toxicology, 2018, 75(2): 199–212.

[15] 薛伟锋, 褚莹倩, 刘强, 等. 主成分分析和模糊综合评价法在大连市地下水水质评价中的应用研究[J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2020, 47(3): 218–226. [Xue Weifeng, Chu Yingqian, Liu Qiang, et al. Groundwater quality assessment in Dalian based on principal component analysis and fuzzy comprehensive evaluation[J]. Journal of Liaoning University(Natural Science Edition), 2020, 47(3): 218–226.]

[16] 尹发能, 向燕芸. 大冶湖水质模糊综合评价[J]. 湿地科学, 2016, 14(3): 428–432. [Yin Faneng, Xiang Yanyun. Fuzzy comprehensive evaluation of water quality in Daye Lake[J]. Wetland Science, 2016, 14(3): 428–432.]

[17] 周玲, 郭胜利, 张涛, 等. 洪泽湖水质模糊综合评价研究[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(2): 289–291. [Zhou Ling, Guo Shengli, Zhang Tao, et al. Study on fuzzy comprehensive evaluation of water quality of Hongze Lake[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012, 40(2): 289–291.]

[18] 陈宇. 交溪干流水质模糊综合评价研究[J]. 水利科技, 2015(4): 6–10. [Chen Yu. Study on fuzzy comprehensive evaluation of water quality in Jiaoxi main stream[J]. Hydraulic Science and Technology, 2015(4): 6–10.]

[19] 王玉芬, 郝丽雯. 黄河万家寨水库水质模糊综合评价[C]//中国环境科学学会. 2018中国环境科学学会科学技术年会论文集(第三卷). 北京: 中国环境科学学会, 2018: 7. [Wang Yufen, Hao Liwen. Fuzzy comprehensive evaluation of water quality of Wanjiazhai Reservoir on the Yellow River[C]//Chinese Society of Environmental Sciences. Proceedings of the science and Technology Annual Meeting of the Chinese society of Environmental Sciences in 2018 (Volume III). Beijing: Chinese society of Environmental Sciences, 2018: 7.]

[20] 敖成欢, 钟九生, 赵梦, 等. 基于模糊综合法和灰色关联法的百花湖水质评价[J]. 水土保持通报, 2020, 40(1): 116–122, 129. [Ao Chenghuan, Zhong Jiusheng, Zhao Meng, et al. Evaluation on water quality of Baihua Lake based on fuzzy comprehensive method and grey correlation method[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(1): 116–122, 129.]

[21] 白维东, 亢小云, 范金成, 等. 宁夏阅海湖水质综合评估[J]. 宁夏农林科技, 2012, 53(2): 57–60. [Bai Weidong, Kang Xiaoyun, Fan Jincheng, et al. Comprehensive water quality assessment of Yuehai Lake in Ningxia[J]. Ningxia Agricultural and Forestry Science and Technology, 2012, 53(2): 57–60.]

[22] 钟艳霞, 罗玲玲, 虎雪姣, 等. 银川市阅海湿地水质的时空变化[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(6): 175–178. [Zhong Yanxia, Luo Lingling, Hu Xuejiao, et al. Spatial and temporal changes of water quality in Yinchuan Yuehai Wetlands[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2013, 41(6): 175–178.]

[23] 李世龙, 雷兴碧, 邱小琮, 等. 银川阅海湖水生生态系统健康评价[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(3): 168–173, 200. [Li Shilong, Lei Xingbi, Qiu Xiaocong, et al. Health assessment of aquatic ecosystem of Yuehai Lake[J]. South-to-North Water Transfer and Water-Science & Technology, 2020, 18(3): 168–173, 200.]

[24] 谢俊斐, 米文宝. 银川阅海湿地水质营养状况评价[J]. 中国水土保持, 2013(2): 51–54. [Xie Junfei, Mi Wenbao. Evaluation of water quality and nutrition status of Yuehai wetland in Yinchuan[J]. Soil and Water Conservation in China, 2013(2): 51–54.]

[25] 黄小琴, 张一冰, 李英, 等. 银川市湖泊—地下水转化关系——以阅海湖为例[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1–10. [Huang Xiaoqin, Zhang Yibing, Li Ying, et al. Conversion relationship between lake and groundwater in Yinchuan City: A case study for the Yuehai Lake[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1–10.]

[26] 曾永, 樊引琴, 王丽伟, 等. 水质模糊综合评价法与单因子指数评价法比较[J]. 人民黄河, 2007, 29(2): 45−65. [Zeng Yong, Fan Yinqin, Wang Liwei, et al. Comparison of fuzzy comprehensive evaluation method and single factor index evaluation method for water quality[J]. Yellow River, 2007, 29(2): 45−65.]

[27] 高海勇. 模糊综合评价在东湖水环境质量评价中的应用[J]. 科技情报开发与经济, 2007, 17(23): 161−167. [Gao Haiyong. Application of fuzzy comprehensive evaluation in water environment quality assessment of East Lake[J]. Science and Technology Information Development and Economy, 2007, 17(23): 165−167.]

[28] 刘春凤, 翟瑞彩. 基于模糊数学的水质分析[J]. 天津大学学报, 2003, 36(1): 72−76. [Liu Chunfeng, Zhai Ruicai. Analysis of water quality based on fuzzy mathematics[J]. Journal of Tianjin University, 2003, 36(1): 72−76.]

[29] He Biyan, Dai Minhan, Zhai Weidong, et al. Hypoxia in the upper reaches of the Pearl River estuary and its maintenance mechanisms: A synthesis based on multiple year observations during 2000−2008[J]. Marine Chemistry, 2014, 167: 13−24.

[30] 张莹莹, 张经, 吴莹, 等. 长江口溶解氧的分布特征及影响因素研究[J]. 环境科学, 2007, 28(8): 1649−1654. [Zhang Yingying, Zhang Jing, Wu Ying, et al. Charateristics of dissolved oxygen and its affecting factors in the Yangtze estuary[J]. Environmental Science, 2007, 28(8): 1649−1654.]

[31] 饶国铨. 城市供水末端饮用水总有机碳TOC监测分析[J]. 节能与环保, 2019(6): 68−69. [Rao Guoquan. TOC monitoring and analysis of total organic carbon in drinking water at the end of urban water supply[J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2019(6): 68−69.]

Water quality evaluation and spatial difference of Yuehai wetland in Ningxia

YANG Lei[1,2], QU Xiangning[1,2], MA Zhenghu[1,2], ZHNAG Yuxun[1,2], TIAN Yuan[1,2], HE Zhirun[1,2]

(1. State Key Laboratory Breeding Base of Land Deogradation and Ecosystem Restoration, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 2. Key Laboratstory of Northwest Degra Ecosystem Restoration and Reconstruction, Ministroy of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: This study aimed to determine the influence of water depth, reed distribution, water intake, and drainage outlet distribution on the water quality of Yuehai wetland in Ningxia. Data from 14 water points were collected and analyzed in the spring (may), summer (August) and autumn (November) of 2019 following the environmental quality standard for surface water (GB3838-2002), and the water quality of Yuehai wetland was evaluated using the fuzzy comprehensive evaluation method. Additionally, differences in the spatial distribution of the samples were evaluated. Most of the seasonal water quality indices of Yuehai Lake were between class III and class IV. Among them, the water quality was worst in May, relatively good in November, and moderate in August. Additionally, the spatial distribution of the water quality indices of Yuehai lake changed in different seasons. In May, the Yuehai water body exhibited class II water quality in shallow areas, class IV water quality in the reed area, water inlet, and deep water area. In August, there was class IV water quality in the deep water area and reed area, class I water quality in the water inlet, and class III water quality in other areas, and in November, there was class IV water quality in the water inlet and class III water quality in other areas. Lastly, the temporal and spatial variation of water quality indices in Yuehai lake were related to the external input of artificial water supplement, tourism activities, bird habitat and breeding, and the disturbance of natural and human factors on the lake sediment. These results can be used as a reference for the management of water resources and the ecological environment in arid areas, such as Yuehai wetland.

Keywords: Yuehai wetland; water quality; fuzzy comprehensive evaluation; spatial difference; Ningxia